

V-10 低温状況下で打設したマスコンクリートのひびわれに関する一実験

開発土木研究所 正員 中井 健司
開発土木研究所 正員 島田 武
開発土木研究所 正員 小林 将
開発土木研究所 正員 佐藤 昌志

1. はじめに

近年、土木構造物の大型化にともない、セメントの水和発熱による温度ひびわれの発生がしばしば問題となり、その制御対策から低発熱型セメントの使用などが有効と考えられている。反面、特に北海道のような積雪寒冷地における冬期施工を考えた場合、低発熱セメントでは強度発現がさらに遅れることになる。そのため所定の材齢で強度を確保することが難しくなるばかりでなく、温度ひびわれ発生の可能性が高まることも考えられる。このような背景をふまえて、本報告では低温環境下で施工されるマスコンクリートについて、低発熱型の高炉セメントを使用した場合の温度ひびわれの抑制効果について、実大規模モデル実験を通じて検討した。また、型枠材に発砲スチロールを用いた場合の保温効果についても実験を通して検証した。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に使用したコンクリートの配合表を表-1に示す。セメントはマスコンクリートを考慮し低発熱型の高炉セメントB種とした。また、配合強度は材齢28日で18N/mm²とし、減水剤、AE剤、高性能減水剤、高性能AE減水剤等を使用し単位水量の低減、ワーカビリティの改善を図った。

表-1 コンクリートの配合表

単位量 (kg/m ³)					配合条件					
セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤	セメント種類	スランプ	空気量	Gmax	W/C	S/a
C	W	S	G	Ad.		cm	%	mm	%	%
273	141	791	1131	0.546	高炉B	8	4.5	40	51.7	40.5

2. 2 実験装置

マスコンクリートの温度履歴および強度発現を把握するために使用した実験装置の概要を図-1に示す。室内に置かれた冷蔵庫より室外に設置された発砲スチロール製の低温庫内にダクトを使いブローにより冷気を供給し、低温庫内の温度を一定に保てるようにした。

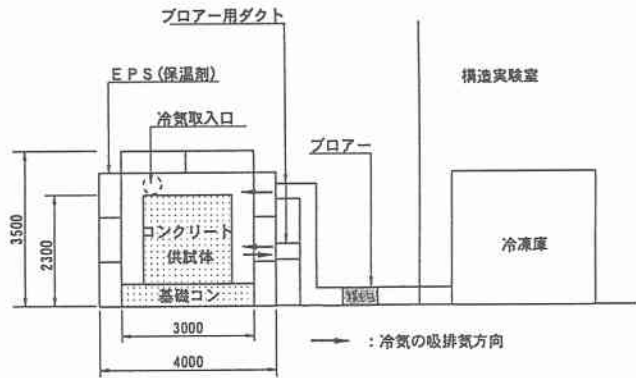


図-1 実験装置概要図

Experiment on the cracking characteristics of low temperature cast-mass-concrete
by Kenji NAKAI, Takeshi SHIMADA, Masaru KOBAYASHI, Masashi SATO,

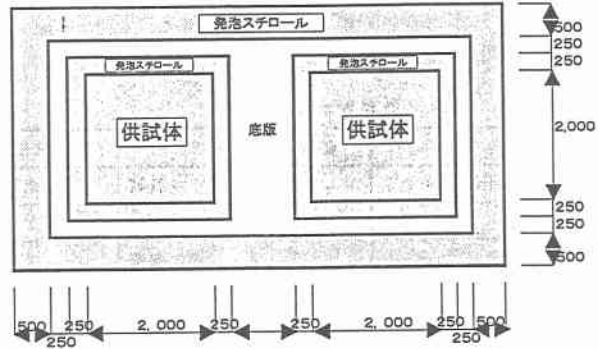
2. 3 供試体

供試体は $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ の大きさのものを2体製作した。コンクリートの打設にあたり供試体の側面は 2.5 cm 厚の発砲スチロールで覆い、さらに外側は合板型枠を設置し断熱状態とした。また、上面は厚さ 12 mm の養生マットを敷設した。供試体の形状寸法を図-2に示す。

2. 4 実験方法

コンクリートの打設は冬期施工を想定して雰囲気温度を 5°C に設定した低温庫内で行なった。2体の供試体の内、1体は温度（熱電対）、ひずみ（ひずみ計）についてコンクリート打ち込み直後からの経時変化について測定を行なった。また、もう1体はコア採取のための試験体とし、計測項目は圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比とした。同時に低温庫内に標準供試体を置き、現場養生（ 5°C ）の後、圧縮強度試験を行なった。図-3にコンクリートコアの採取位置図、図-4に計測器の配置図を示す。

平面図



側面図

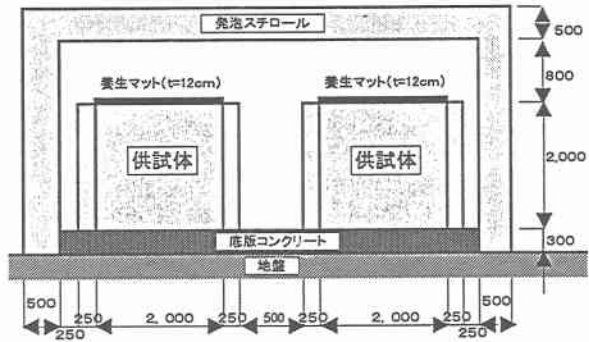


図-2 供試体の形状寸法

平面図

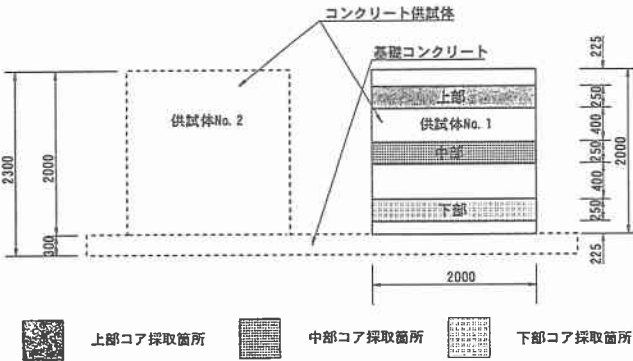
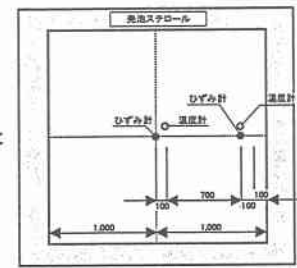


図-3 コアの採取位置

側面図



側面図

3. 実験結果および考察

3. 1 温度履歴曲線

コンクリート供試体の中央部、端部の温度履歴の測定結果を図-5に示す。供試体内の中央部での最高温度は供試体中心より 20 cm 下部の観測点C8で最大 58°C に達している。上方に向かうに従って放熱の影響により温度が低下し、表面部では $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ の間で推移している。中心部の温度低下は、発

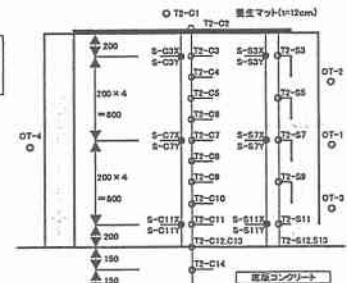
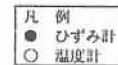


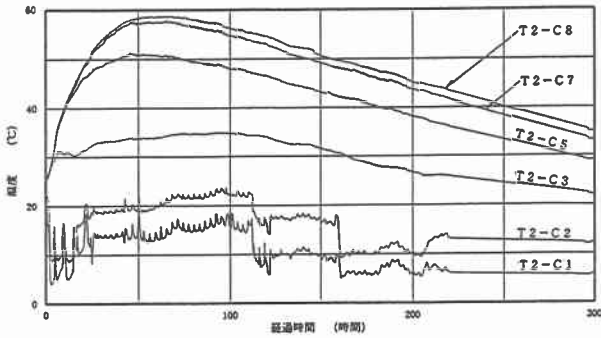
図-4 計測器の配置図

砲スチロールによる保温の効果で
 降下速度が緩慢である。また、供
 試体端部の最高温度は中心部の観
 測点 S 7 で最大 5 6℃に達しており
 中央部と差はみられない。この
 ように発砲スチロールの保温効果
 は大きく、水平方向の温度勾配を
 ごく小さく抑えることが明らかと
 なった。

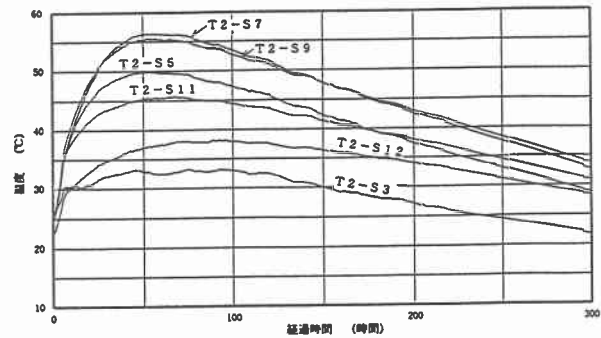
3. 2 ひずみ履歴曲線

コンクリート供試体の中央部、
 端部のひずみ履歴の測定結果を図
 ー 6 に示す。中央部では引張りひ
 ずみの最大値は、供試体上端 (S
 -C 3 Y) で大きくなっており最大
 1 4 0 μ に達している。供試体
 中央部 (S-C 7 X、S-C 7 Y)
 では、打設直後から相対的に温度
 が高くなることから、圧縮ひずみ
 が増大している。また、供試体端
 部では供試体下端 (S-S 1 1 Y)
 で最大 2 0 0 μ を越えており、い
 ずれも供試体内部と表面の温度差
 に起因する内部拘束ひずみの影響
 であると考えられる。また、温度
 降下段階 (材齢 5 0 時間以後) に
 なっても、各位置のひずみは引張
 側へ移行していない。このことは、
 供試体の体積が大きいために基礎
 コンクリートが供試体を拘束する
 度合 (外部拘束度) が小さいため
 と考えられる。さらに発砲スチロ
 ールの保温効果のために、温度降
 下速度が小さかったことも理由の
 ひとつと考えられる。一方、打設
 後の供試体の表面観察によれば、
 ひびわれの発生は全く確認されな
 かった。また、計測されたひずみ
 曲線にもひびわれが発生したよう
 な動きは見られなかった。

①中央部

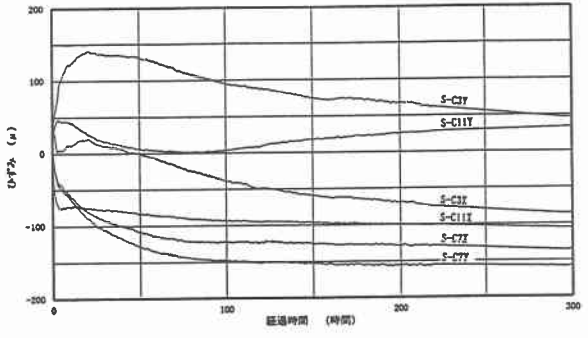


②端 部

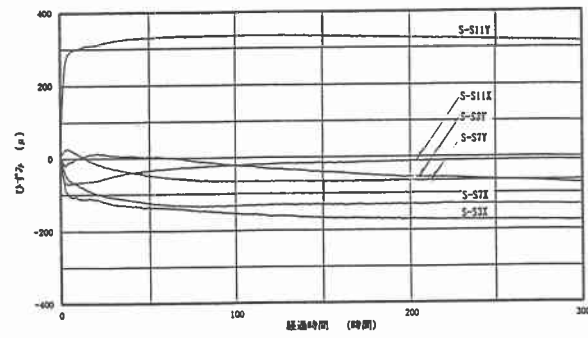


図ー 5 コンクリートの温度履歴

①中央部



②端 部



図ー 6 コンクリートのひずみ履歴

3. 3 物理特性試験結果

圧縮強度試験結果を静弾性係数およびポアソン比とともに表－2に示す。コンクリートの圧縮強度の発現速度は、その養生温度に大きく影響されるので、積算温度によって評価するとその関係は図－7のようになる。また、圧縮強度と静弾性係数およびポアソン比の関係を図－8に示す。

表－2 圧縮強度、静弾性係数試験結果

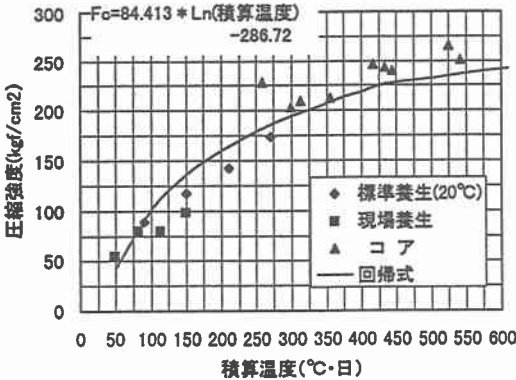
区 分		標準養生(水中20℃)				現場養生(気中5℃)			
		3日	5日	7日	9日	3日	5日	7日	9日
圧縮強度	kg/cm2	89	118	143	174	55	80	89	99
静弾性係数(×10-5)	kg/cm2	1.106	1.469	1.548	1.765	0.785	1.169	1.149	1.335
ポアソン比		0.157	0.196	0.194	0.189	0.159	0.173	0.153	0.168

区 分		コ ア								
		5日			7日			9日		
		上	中	下	上	中	下	上	中	下
圧縮強度	kg/cm2	229	210	203	213	243	247	240	251	265
静弾性係数(×10-5)	kg/cm2	1.949	2.039	2.127	1.917	2.389	2.174	1.962	2.245	2.046
ポアソン比		0.178	0.19	0.211	0.192	0.222	0.237	0.195	0.222	0.202

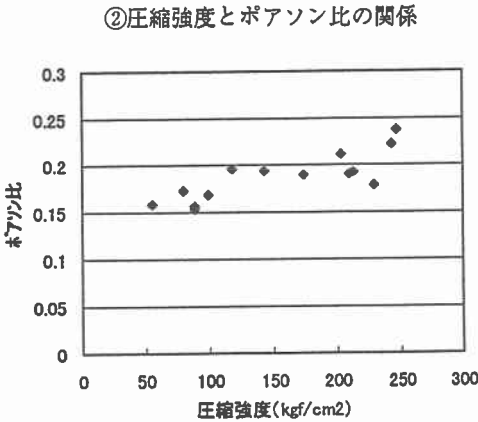
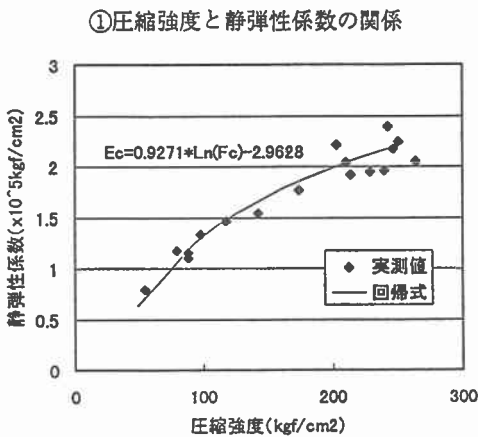
$MT = \sum (\Theta + 10) \times d t$

ここに、MT：積算温度 (℃・hour)
 Θ ：平均養生温度 (℃)
dt：養生時間 (hour)

図に示すように、圧縮強度の発現は、養生温度が異なっている場合でも積算温度で評価することによって、ある程度の精度で推定できることがわかった。言い換えれば十分な保温対策を採り、コンクリートの養生温度を確保すれば十分な強度発現が得られることになる。また静弾性係数についても同程度の精度で圧縮強度から推定することができる。ポアソン比は圧縮強度の増加にともない若干大きくなる傾向を示した。



図－7 積算温度と圧縮強度の関係



図－8 圧縮強度と静弾性係数およびポアソン比の関係

3. 4 温度解析

供試体を模擬した非定常3次元FEM熱伝導解析を行ない、温度の実測値と解析値の比較を行なった。解析に当たっては、非線形構造解析プログラムABAQUS ver4.9を用い、供試体は対称形なのでモデルは供試体の1/4モデルとした。図-9に解析条件を示す。

② 熱特性値一覧表

項 目	単 位	供 試 体	底 版	地 盤
比 熱	kcal/kg・℃	0.275	0.275	0.19
熱 伝 導 率	kcal/m・h・℃	2.3	2.3	3.0
単 位 容 積 重 量	kg/m³	2336	2336	2650

③ 熱伝達率の設定値

部 位	養 生 方 法	熱 伝 達 率 kcal/m²・h・℃
供 試 体 上 面	マット保温湿両養生	4.5 *1)
供 試 体 側 面	発泡スチロール (t=25cm)	0.01
底 版 上 面	無養生	11
地 盤 上 面	無養生	11

*1) 標準示方書より
*2) 発泡スチロールの熱伝導率0.0025kcal/m・h・℃

図-9 解析条件

断熱温度上昇式は式(1)に示すように、コンクリート標準示方書、土木学会編に示される式に従った。

$$Q(t) = Q(1 - e^{-rt}) \cdots \text{式(1)}$$

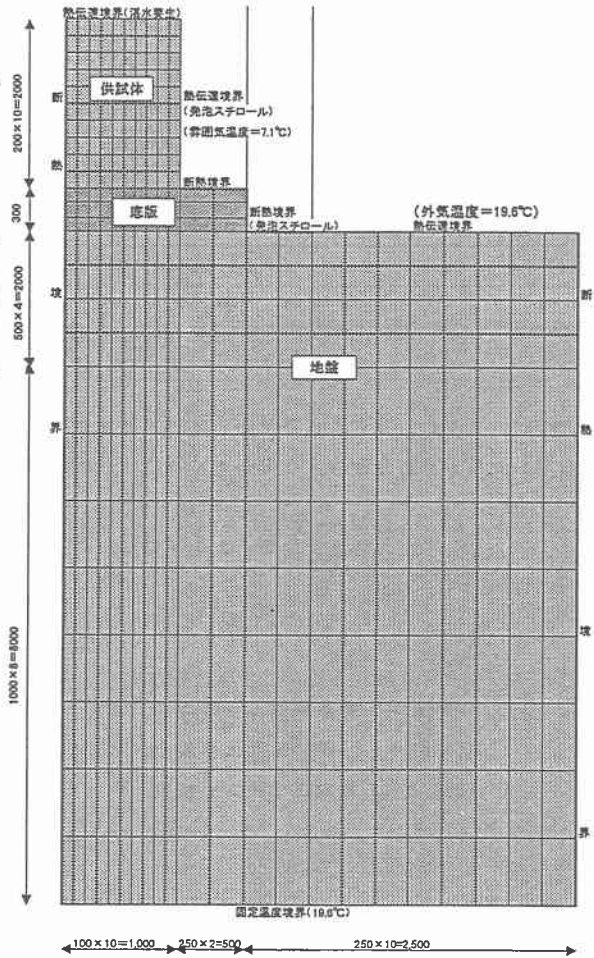
$Q(t)$: 断熱温度上昇量 (℃) r : 温度上昇速度に関する定数 (1.089)

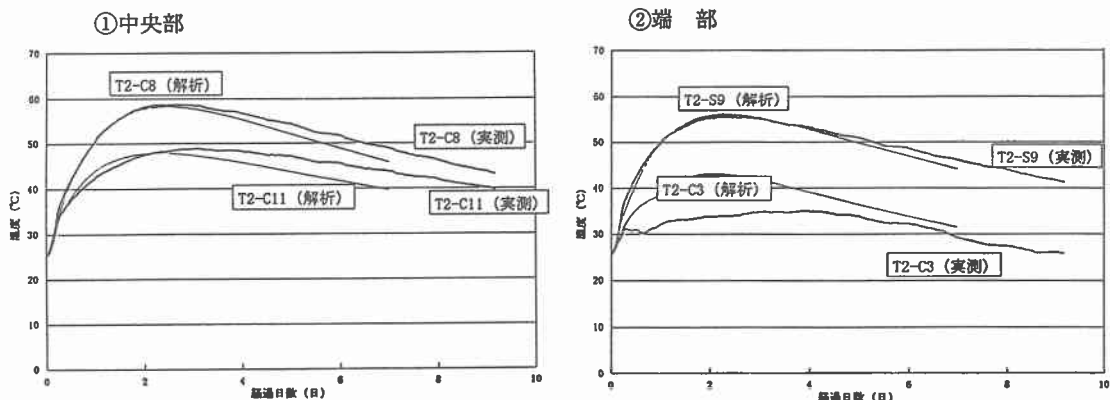
Q : 終局断熱温度上昇量 (42.3℃) t : 材齢 (日)

ただし、式中のQ、rをパラメータと考え、解析結果と実測値が最も近づくようなQ、rを選定した。この結果、供試体中心の温度履歴の解析値と実測値は、図-10に示すように供試体中央部、端部ともほぼ近似させることができた。断熱温度上昇式を式(2)のように定義することによって、温度上昇速度は標準示方書に従って求めた値を約10%低減し、同様に終局断熱温度上昇量は約1℃低減する結果となった。また、図-10の解析結果から供試体表面近くの温度履歴の実測値が解析値を大きく下回っていることは、養生方法や外部環境に応じた熱伝達率の設定方法に検討の余地があることを示すものである。

$$Q(t) = 41.3(1 - e^{-1.000t}) \cdots \text{式(2)} \quad (\text{打込み温度} = 25^\circ\text{C})$$

① 解析モデル





図－１０ 解析結果（温度履歴曲線の比較）

４． まとめ

以上の実大規模モデル実験を行なうことによって、低温環境下で施工される低発熱セメント適用上の課題（温度ひびわれおよび強度発現）に関し、対策の方向性を見いだすことができた。つまり、発砲スチロール等の断熱材で部材表面を十分に保温すれば、部材内外の温度差に起因する内部拘束応力、ならびに部材全体の温度降下に起因する外部拘束応力を効果的に低減できることが実証された。また、強度発現速度の小さい低発熱型セメントを使用した場合も、養生温度を確保することで強度発現を確保できることが確認できた。一方、３次元ＦＥＭ熱伝導解析により、精度よく部材内の温度を推定することができ、温度履歴に依存したコンクリートの物理特性も同程度に推定可能であることがわかった。反面、外部拘束応力が卓越する場合は、発熱後の温度降下が大きくなることにより、ひびわれの発生の確率が大きくなる可能性がある。その場合には断熱材の形状寸法、保温期間等を検討し、内部上昇温度を抑制する方法が必要と考えられる。今回は温度解析のみの報告に留まったが、今後温度解析結果に基づく温度ひずみ、温度応力解析をある程度の精度で行ない、低温環境下におけるマスコンクリート問題の対策に生かしたいと考える。

〔参考文献〕

- １）コンクリート標準示方書（施工編） 平成８年度版 （社）土木学会 pp. 173～193